Meta 分析研究饲粮性洗涤纤维与淀粉比值对奶牛生产性能和乳成分合成的影响1

牛俊丽[1,2] 王 典[3*] 赵 勐[3] 张文举[2] 卜登攀[1,4,5] 马 露[1**]

（1.中国农业科学院北京畜牧兽医研究所，动物营养学国家重点实验室，北京 100193；2.石河子大学动物科技学院，石河子 832000；3.内蒙古优然牧业有限责任公司，呼和浩特 010000；4.中国农业科学院与世界农用林业中心，农用林业与可持续畜牧业联合实验室，北京 100193；5. 湖南畜产品质量安全协同创新中心，长沙 410128）

摘 要：本试验旨在采用 Meta 分析方法研究饲粮中性洗涤纤维（NDF）与淀粉（starch）比值对奶牛生产性能和乳成分合成的影响。试验整理了 27 篇有关奶牛碳水化合物营养的研究，共计 123 个处理，运用 Meta 分析方法研究饲粮 NDF、starch 含量以及 NDF 与 starch 比值与奶牛干物质采食量、产奶量和乳成分的相关性，并进行相应的回归分析。结果显示：相较于饲粮 NDF 和 starch 含量，饲粮 NDF 与 starch 比值与奶牛的干物质采食量（R^2=-0.799，P<0.01）、产奶量（R^2=-0.730，P<0.01）、乳脂率（R^2=0.664，P<0.01）和乳蛋白率（R^2=-0.788，P<0.01）的相关性更强；饲粮 NDF 与 starch 比值与奶牛的干物质采食量(P=0.02)、产奶量（P<0.01）、乳脂率（P<0.01）、乳蛋白率（P<0.01）、乳蛋白产量（P<0.01）和乳糖产量（P<0.01）存在显著的一元线性回归关系，饲粮 NDF 与 starch 比值每增加 1，奶牛的干物质采食量、产奶量、乳蛋白产量和乳糖产量分别降低 0.81、1.36、0.06 和 1.50 kg，乳脂率和乳蛋白率分别增加 0.11%和 0.07%。Meta 分析结果表明，饲粮 NDF 与 starch 比值可作为反映奶牛饲粮碳水化合物组成的营养评价指标，用于指导奶牛的生产和调控乳成分的组成。

关键词：奶牛；碳水化合物组成；生产性能；乳成分；Meta 分析

收稿日期:2018-03-06

基金项目:中国农业科学院科技创新工程协同创新任务（CAAS-XTCX2016011-01）；中国农业科学院科技创新工程（ASTIP-IAS07）；奶牛产业科技北京市创新团队（BAIC06-2018）

作者简介:牛俊丽(1990-)，女，新疆额敏人，博士研究生，研究方向为反刍动物营养与饲料科学。E-mail: niujuliaa@126.com

*共同贡献作者

**通信作者:马 露，助理研究员，E-mail: malu.nmg@163.com

中图分类号：S816;S823.9+1　　　　文献标识码：A　　　　文章编号：

碳水化合物是奶牛饲粮的重要组成部分，占饲粮干物质的 60%~80%，碳水化合物在奶牛瘤胃和后肠道消化后为瘤胃微生物和机体代谢提供能量[1-2]，碳水化合物奶牛的主要能量来源。瘤胃乙酸是奶牛乳脂从头合成的重要底物，丙酸是奶牛葡萄糖糖异生的最主要底物[3]，饲粮碳水化合物的组成可以通过改变瘤胃内乙酸与丙酸的比值或影响瘤胃上皮细胞挥发性脂肪酸吸收和代谢相关基因的表达[4]，改变瘤胃的发酵模式，进而影响牛奶中乳脂和乳糖的含量。此外，微生物蛋白和可代谢蛋白质合成能力对于奶牛乳蛋白的合成至关重要，是饲粮蛋白质转化为乳蛋白的枢纽和纽带，而碳水化合物在瘤胃的降解产物能够为微生物提供能量，促进瘤胃微生物的增殖和瘤胃可代谢蛋白质向微生物蛋白的转化，因此，碳水化合物是影响微生物蛋白与可代谢蛋白质合成能力及乳腺摄取血液游离氨基酸能力的重要因素[5-6]。饲粮碳水化合物在瘤胃中的降解程度和速度会直接影响奶牛瘤胃和机体的健康，谷物类含量较高的饲粮在瘤胃中的降解程度和速度较快，易引起奶牛挥发性脂肪酸或乳酸的累积，造成瘤胃 pH 降低，继而发生瘤胃亚急性或急性酸中毒[7]；粗饲料的长度也是影响瘤胃 pH 的重要因素，粗饲料长度过短会降低其对瘤胃的刺激，影响奶牛的反刍和咀嚼行为[8]，减少唾液分泌[9]，进而降低其对瘤胃挥发性脂肪酸的中和能力[10]，造成瘤胃 pH 降低[11]。因此，如何平衡碳水化合物的组成是维护奶牛瘤胃健康的关键性问题。

饲粮的碳水化合物组成与奶牛的产奶量、乳成分、奶牛机体健康和饲料利用率密切相关。碳水化合物主要包括结构性碳水化合物和非结构性碳水化合物[12]。从化学成分划分，中性洗涤纤维（neutral detergent fiber,NDF）和淀粉（starch）分别是结构性碳水化合物和非结构性碳水化合物的主要组成部分。Beckman 等[1]首次用 NDF 与 starch 比值研究了饲粮碳水化合物对营养物质降解率的影响，近年来许多学者研究了饲粮中 NDF 与 starch 比值对奶牛生产性能和乳成分的影响[9,13-14]，为了进一步探讨饲粮中 NDF 与 starch 比值能否作为饲粮碳水化合物组成的综合评价指标，本试验采用 Meta 分析方法探究饲粮 NDF 与 starch 比值作为评价饲粮碳水化合物组成的可行性，并研

究其与奶牛生产性能和乳成分的相关性。

1　材料与方法

1.1　文献检索和筛选

文献检索：采用 Web of Science、Science Direct、PubMED 以及 NCBI 等数据库进行相关文献的检索，检索关键词包括 dairy cows、milk production、milk composition、carbohydrate、starch 以及 forage and concentrate ratio 的不同组合。

文献数据筛选标准：1）试验动物为荷斯坦泌乳奶牛；2）饲粮信息完整，必须包括粗蛋白质（CP）、NDF 以及 starch 含量；3）生产性能数据完整，包括采食量、产奶量以及乳成分。通过文献检索和数据筛选，最终获得 27 篇文献的 123 个处理，分析所有纳入文献的试验设计，挑选文献中具体的研究组别，建立总数据库（表 1）。

表 1　Meta 分析相关文献及数据来源

Table 1　Publications and data used in the Meta analysis

编号 No.	参考文献（发表年） References (published year)	处理数 Treatment No.	编号 No.	参考文献（发表年） References (published year)	处理数 Treatment No.
1	Abrahamse 等[15] (2008)	7	15	Benchaar等[28] (2014)	4
2	Hristov等[16] (2003)	2	16	San Emeterio等[29] (2000)	6
3	Aguerre等[17] (2011)	4	17	Boivin等[30] (2013)	4
4	Kendall 等[18](2009)	4	18	Sterk等[31] (2011)	13
5	Alstrup 等[19] (2014)	4	19	Cabrita等[32](2007)	4
6	Krause 等[20] (2002)	4	20	Whelan等[33] (2014)	2
7	Alzahal 等[21](2009)	8	21	Eriksson等[34] (2004)	3
8	Krause 等[22] (2003)	4	22	Zhang等[35](2010)	7

9	Arndt 等[23] (2014)	4	23	Gozho等[36] (2008)	4
10	Miyaji 等[24] (2012)	3	24	Zhao等[37] (2016)	4
11	Beauchemin 等[25] (2003)	4	25	Hall等[38] (2010)	6
12	Mullins 等[26] (2010)	4	26	Le等[39] (1998)	4
13	Beckman 等[1] (2005)	3	27	Hassanat等[40] (2013)	3
14	Ranathunga 等[27] (2010)	4			

1.2 数据统计与分析

Meta 分析在多水平试验分析时，利用 SAS 9.1 软件的 Mixed 模型，首先假设研究间存在异质性（饲粮、特殊添加剂使用、动物体况以及统计方法等），利用对研究间效应的校正剔除研究间的差异，从而将所有研究纳入同一个研究中，研究不同饲粮 NDF 与 starch 比值对试验结果的影响。

模型一般式如下：

$Y_{ij}=B_0+B_i+B_{1i}X_{ij}+e_{ij}$。

式中：i 为研究个数（i=1，2，3，…，n）；j 为每个研究中的观察数（j=1，2，3，…，n）；B_0 为全部研究的总截距（固定效应）；Bi 为第 i 个研究的随机效应；B_{1i} 为第 i 个研究的一次项回归系数；e_{ij} 为残差，服从正态分布 N（0， σ^2）（随机效应）。

SAS 混合效应代码如下：

```
PROC MIXED data =temp；
CLASS Study；
MODEL Y=X Z/Solution OUTP =Predictionset OUTPM=PredY；
RANDOM intercept X/TYPE =UN SUBJECT=Study；
```

RUN；

以经过随机效应校正的自变量（饲粮 NDF 与 starch 比值）为 Y 轴，干物质采食量、产奶量、乳脂率、乳蛋白率、乳糖率、乳脂产量、乳蛋白产量或乳糖产量为 X 轴进行曲线拟合。利用 SAS 9.1 软件计算回归系数 P 值、模型均方根误差（root mean square error,RMSE）、F 值及相关系数（R^2）。

RMSE 计算公式：

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{obs,i}-x_{model,i}\right)^2}{n}}。$$

式中:x_{obs}为观测值；x_{model}为真值；n 为观测次数。

2　结果与分析

2.1 饲粮和奶牛生产信息描述

饲粮营养成分和奶牛信息如表 2 所示。纳入 Meta 分析的饲粮 CP、NDF、starch 含量平均分别为 17.1%、33.2%和 21.7%，最高和最低含量之间分别相差 40.8%、57.8%和 89.4%；NDF 与 starch 比值平均为 1.92。在奶牛生产参数方面，27 个试验的 123 个处理统计结果发现：奶牛干物质采食量、产奶量、乳脂率、乳脂产量、乳蛋白率、乳蛋白产量平均分别为 23.3 kg/d、35.7 kg/d、3.78%、1.32 kg/d、3.17%、1.14 kg/d；21 个试验的 96 个处理统计结果发现：乳糖率和乳糖产量平均分别为 4.72%和 1.69 kg/d。

表 2　Meta 分析中饲粮和奶牛生产相关数据

Table 2　Database of diets and dairy production in Meta analysis

项目 Items	处理数 Treatment No.	试验数 Trail No.	平均值 Mean	标准差 SD	最小值 Minimum	最大值 Maximum
饲粮参数 Diet parameters						
粗蛋白质 CP/(%DM)	123	27	17.10	1.56	11.90	20.1
中性洗涤纤维 NDF/(%DM)	123	27	33.20	5.17	23.00	54.5

淀粉 Starch/(%DM)	123	27	21.70	7.72	3.82	35.9
中性洗涤纤维与淀粉比值 NDF:starch	123	27	1.92	1.37	0.68	9.56
生产参数 Production parameters/(kg/d)						
干物质采食量 DMI	123	27	23.30	2.51	17.00	29.7
产奶量 MY	123	27	35.70	5.82	19.10	48.0
乳成分 Milk composition/%						
乳脂率 Milk fat percentage	123	27	3.78	0.40	3.14	4.90
乳蛋白率 Milk protein percentage	123	27	3.17	0.28	2.61	3.94
乳糖率 Lactose percentage	96	21	4.72	0.18	4.33	5.08
乳成分产量 Milk composition production/(kg/d)						
乳脂产量 Milk fat yield	123	27	1.32	0.18	0.78	1.70
乳蛋白产量 Milk protein yield	123	27	1.14	0.25	0.68	3.10
乳糖产量 Lactose yield	96	21	1.69	0.33	0.84	2.82

2.2 饲粮NDF与starch比值与奶牛干物质采食量、产奶量和乳成分的线性相关性分析

由表 3 可知，饲粮 NDF 含量与乳脂率（R^2=0.567，P<0.01）呈显著的线性正相关，与干物质采食量（R^2=-0.678,P<0.01）、产奶量（R^2=-0.517,P<0.01）、乳蛋白率（r^2=-0.704,P<0.01）、乳脂产量（R^2=-0.345,P<0.01）、乳蛋白产量（R^2=-0.298,P<0.01）以及乳糖产量（R^2=-0.429,P<0.01）呈显著的线性负相关；饲粮 starch 含量与干物质采食量（R^2=0.699,P<0.01）、产奶量（R^2=0.650,P<0.01）、

乳蛋白率（R^2=0.732,P<0.01）和乳糖产量（R^2=0.489,P<0.01）呈显著的线性正相关，与乳脂率（R^2=-0.658,P<0.01）呈显著的线性负相关；饲粮 NDF 与 starch 比值与乳脂率（R^2=0.664,P<0.01）和乳糖产量（R^2=-0.355,P<0.01）呈显著线性正相关，与干物质采食量（R^2=-0.799,P<0.01）、产奶量（R^2=-0.730,P<0.01）、乳蛋白率（R^2=-0.788,P<0.01）以及乳蛋白产量（R^2=-0.567,P<0.01）呈显著线性负相关；奶牛的干物质采食量与奶牛的生产性能相关性最强，与产奶量（R^2=0.820,P<0.01）、乳蛋白率（R^2=0.756,P<0.01）、乳脂产量（R^2=0.394,P<0.01）、乳蛋白产量（R^2=0.923,P<0.01）以及乳糖产量（R^2=0.730,P<0.01）呈显著线性正相关，与乳脂率（R^2=-0.644,P<0.01）呈显著线性负相关。

表 3　饲粮营养成分与奶牛干物质采食量、产奶量和乳成分的线性相关性分析

Table 3　Linear correlation analysis of diet nutritional composition with DMI, MY and milk components

项目 Items	干物质采食量 DMI	产奶量 MY	乳脂率 Milk fat percentage	乳蛋白率 Milk protein percentage	乳糖率 Lactose percentage	乳脂产量 Milk fat yield	乳蛋白产量 Milk protein yield	乳糖产量 Lactose yield
中性洗涤纤维 NDF	-0.678 (P<0.01)	-0.517(P<0.01)	0.567(P<0.01)	-0.704(P<0.01)	-0.146(P=0.17)	-0.345((P<0.01)	-0.298(P<0.01)	-0.429(P<0.01)
淀粉 Starch	0.699(P<0.01)	0.650(P<0.01)	-0.658(P<0.01)	0.732(P<0.01)	-0.122(P=0.25)	-0.034(P=0.72)	0.149(P=0.11)	0.489(P<0.01)
中性洗	-0.799(P<	-0.730(P<	0.664(P<0	-0.788(P<	0.020(P=0	-0.126(P=0	-0.567(P<	0.355(P<0

涤纤维与淀粉比值 NDF:starch	0.01)	0.01)	.01)	0.01)	.85)	.18)	0.01)	.01)
干物质采食量 DMI	1.000(*P*<0.01)	0.820(*P*<0.01)	-0.644(*P*<0.01)	0.756(*P*<0.01)	0.064(*P*=0.55)	0.394(*P*<0.01)	0.923(*P*<0.01)	0.730(*P*<0.01)

P>0.05表示相关性不显著，P<0.05表示相关性显著。

P>0.05 means no significant correlation, P<0.05 means significant correlation.

2.3 饲粮NDF与starch比值与奶牛干物质采食量、产奶量和乳成分的一元线性回归关系分析

饲粮 NDF 与 starch 比值与奶牛干物质采食量、产奶量和乳成分的一元线性回归分析关系结果如表 4 所示。Meta 分析结果表明，饲粮 NDF 与 starch 比值对干物质采食量（P<0.01）、产奶量（P<0.01）、乳脂率（P<0.01）、乳蛋白率（P<0.01）、乳蛋白产量（P<0.01）和乳糖产量（P<0.01）的一元线性回归方程均达到显著水平。饲粮 NDF 与 starch 比值每增加 1，奶牛的干物质采食量和产奶量分别降低 0.81 和 1.36 kg，一元线性回归曲线如图 1 所示；饲粮 NDF 与 starch 比值每增加 1，奶牛的乳脂率和乳蛋白率分别增加 0.11%和 0.07%，一元线性回归曲线如图 2 所示；饲粮 NDF 与 starch 比值每增加 1，奶牛的乳蛋白产量和乳糖产量分别降低 0.06 和 1.50 kg，一元线性回归曲线如图 3 所示。

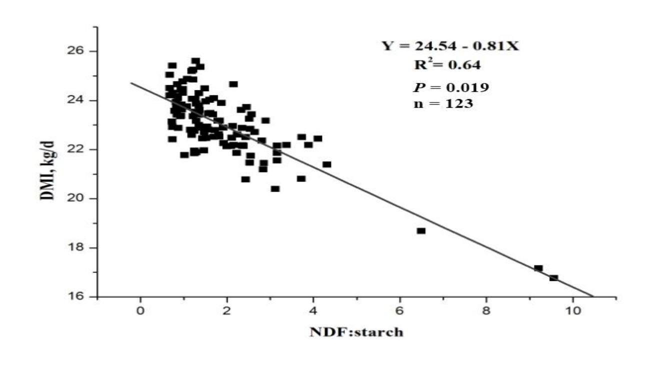
表 4　奶牛干物质采食量、产奶量和乳成分与饲粮 NDF 与 starch 比值的一元线性回归关系分析

Table 4　Linear regression relationship analysis of dietary NDF:starch with DMI, MY and milk components

项目 Items	处理 Treatments	截距 Intercept	一次项 Linear-term（*X*）	均方根误差 RMSE	*F* 值 *F*-value	*P* 值 *P*-value
干物质采食量 DMI	123	24.54	-0.810	0.322	6.37	0.02
产奶量 MY	123	37.40	-1.360	0.419	10.62	<0.01
乳脂率 Milk fat percentage	123	3.58	0.110	0.033	11.50	<0.01
乳蛋白率 Milk protein percentage	123	3.25	0.070	0.022	8.73	<0.01
乳糖率 Lactose percentage	96	4.72	0.001	0.008	0.02	0.89
乳脂产量 Milk fat yield	123	1.31	-0.060	0.007	0.67	0.42
乳蛋白产量 Milk protein yield	123	1.22	-0.060	0.013	17.87	<0.01
乳糖产量 Lactose yield	96	4.53	-1.500	1.150	16.56	<0.01

P>0.05 表示一元线性回归关系不显著，*P*<0.05 表示一元线性回归关系显著。

P>0.05 means no significant linear regression relationship, and *P*<0.05 means significant linear regression relationship.



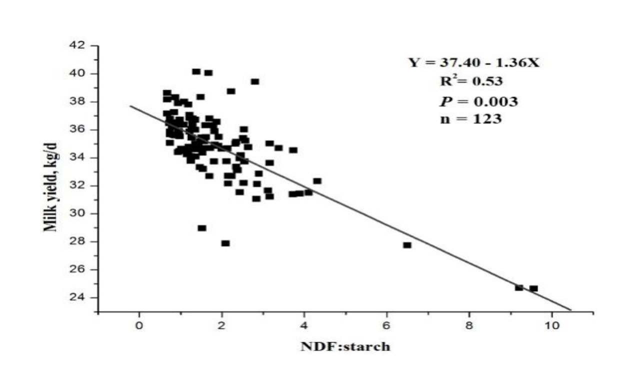


图 1　饲粮 NDF 与 starch 比值与干物质采食量以及产奶量的关系

Fig.1　Relationship between dietary NDF:starch and DMI or MY

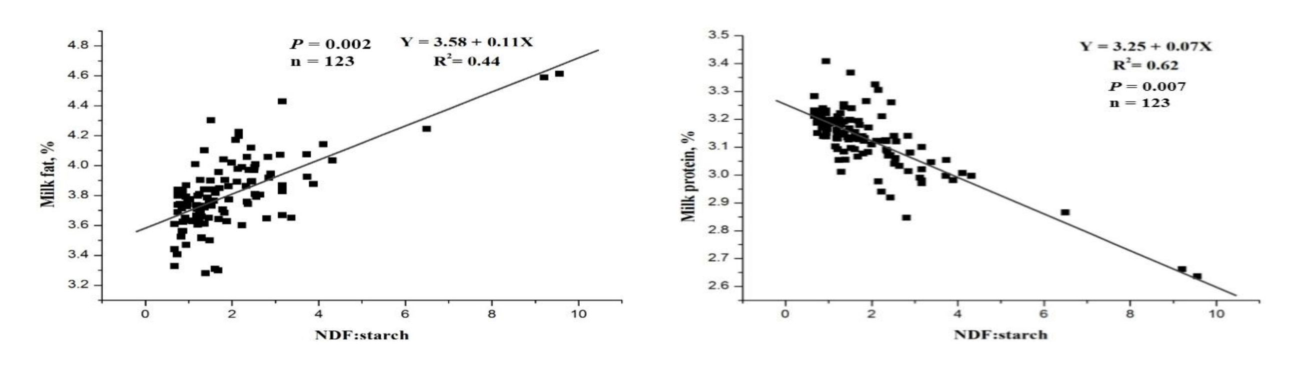


图 2　饲粮 NDF 与 starch 比值与乳脂率以及乳蛋白率的关系

Fig.2　Relationship between dietary NDF:starch and milk fat percentage or milk protein percentage

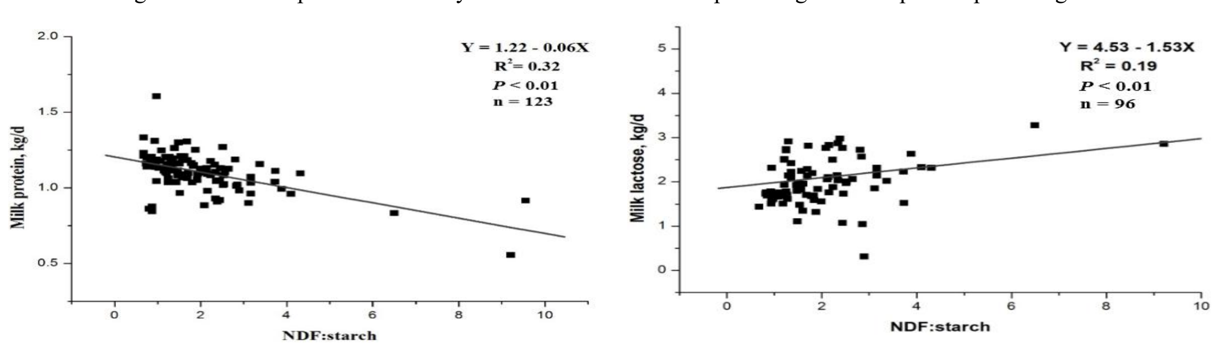


图 3　饲粮 NDF 与 starch 比值与乳蛋白产量以及乳糖产量的关系

Fig.3　Relationship between dietary NDF:starch and milk protein yield or lactose yield

3　讨　论

碳水化合物在反刍动物营养中具有极其重要的作用，其能维持瘤胃正常发酵、保障胃肠道健康及作为瘤胃微生物和动物机体代谢的能量载体等[12]，因此，提出优化奶牛饲粮碳水化合物组成的综合营养学评价指标尤为重要。精粗比只是将植物的茎叶和籽实部分加以区分，体现的仅是纤维物质和非纤维物质含量上的差异[41]。非纤维性碳水化合物与 NDF 比值则更侧重于反映饲粮中碳水化合物和纤维物质的比例。NDF 是结构性碳水化合物的主要组成部分，非结构性碳水化合物中 starch 含量超过 80%，因此，NDF 与 starch 比值能更准确地反映饲粮碳水化合物组成。

干物质采食量是维持奶牛健康和生产所需养分的重要基础，影响干物质采食量的营养因素主要包括饲粮 NDF 含量和精粗比[9,42]。已有研究表明，饲粮 NDF 含量与奶牛干物质采食量之间呈显著的负相关，提高饲粮中 NDF 的含量会降低食糜在瘤胃中的流通速率，进而造成奶牛干物质采食量的降低。在本研究中发现，饲粮 NDF 含量与干物质采食量之间的具有显著的线性负相关性，R^2 达到 0.678。Meta 分析结果表明饲粮 starch 含量与干物质采食量呈现显著的线性正相关（R^2=0.699），这是由于饲粮精粗比的改变通常会改变 starch 的含量，starch 类易发酵碳水化合物能够提高奶牛的干物质采食量，其在瘤胃中的降解速度和流通速度明显高于结构性碳水化合物[43]。而饲粮 NDF 与 starch 比值和奶牛干物质采食量之间呈现显著的线性负相关（R^2=0.799），且相关性高于饲粮 NDF 和 starch 含量与奶牛干物质采食量之间的相关性。因此，饲粮 NDF 与 starch 比值能够更好地预测和评估奶牛的干物质采食量。

已有研究表明，奶牛的产奶量主要受干物质采食量的影响，高干物质采食量能够为奶牛生产和乳成分合成提供更多的营养底物[44]。在本研究中，Meta 分析结果与此观点一致，奶牛干物质采食量与产奶量之间的 R^2 最大，达到 0.820。而作为衡量饲粮碳水化合物组成的营养指标中，与奶牛产奶量的相关性由强到弱依次为饲粮 NDF 与 starch 比值（R^2=-0.730）、饲粮 starch 含量（R^2=-0.650）和饲粮 NDF 含量（R^2=-0.517）。因此，作为评价饲粮碳水化合物组成的指标，NDF 与 starch 比值能够更准确地反映碳水化合物的组成和预测奶牛的产奶量。

饲粮的碳水化合物能够影响奶牛乳成分的合成，饲粮中的 NDF 能够为奶牛乳脂合成提供底物[45]，starch 类易发酵碳水化合物能够促进乳糖的合成[23,46]，瘤胃可发酵碳水化合物能够影响微生物蛋白的合成能力和产量，为乳蛋白合成提供优质蛋白质来源[47]。Meta 分析结果发现，在本试验中反映饲粮碳水化合物组成的指标中，与乳脂率的相关性由强到弱依次为饲粮 NDF 与 starch 比值（R^2=0.664）、饲粮 starch 含量（R^2=0.658）和饲粮 NDF 含量（R^2=0.567），与乳蛋白率的相关性由强到弱依次为饲粮 NDF 与 starch 比值（R^2=-0.788）、饲粮 starch 含量（R^2=0.732）和饲粮

NDF 含量（R^2=-0.704）。相关性结果表明，饲粮 NDF 与 starch 比值与牛奶的乳脂率和乳蛋白率相关性最强，能更准确预测和反映乳脂率和乳蛋白率。然而，饲粮 NDF 与 starch 比值以及饲粮 starch 和 NDF 含量与牛奶的乳糖率无相关性，这可能与牛奶中乳糖率比较稳定有关。在反映牛奶乳成分的指标中，与乳脂率和乳蛋白率相比，牛奶中的乳糖率比较稳定。

乳成分的产量与奶牛的产奶量和乳成分含量有关，在本研究中，乳脂产量与干物质采食量呈线性正相关（R^2=0.394），尽管干物质采食量与奶牛的乳脂率呈线性负相关（R^2=-0.644），由于干物质采食量与产奶量具有极强的相关性，因此，干物质采食量与乳脂产量呈现线性正相关。乳脂产量与饲粮 NDF 含量呈线性负相关（R^2=-0.345），饲粮 NDF 含量与乳脂率呈线性正相关，这可能也是由于饲粮 NDF 含量与产奶量呈线性负相关引起的。饲粮 NDF 与 starch 比值以及以及饲粮 starch 含量与乳脂产量无相关性，提示饲粮 NDF 与 starch 比值可能无法反映乳脂的合成。对于乳蛋白产量，干物质采食量与乳蛋白产量呈极强的线性正相关（R^2=0.923）。Hristov 等[44]通过 Meta 分析方法研究了饲粮碳水化合物与乳蛋白产量的关系，结果表明干物质采食量是乳蛋白产量的决定因素。本研究发现，饲粮 NDF 与 starch 比值与乳蛋白产量呈线性负相关（R^2=-0.567），而饲粮 NDF 含量与乳蛋白产量呈较弱的相关性，饲粮 starch 含量与乳蛋白产量无相关性，表明饲粮 NDF 与 starch 比值能够在一定程度上反映乳蛋白的合成能力。对于乳糖产量，奶牛干物质采食量与乳糖产量相关性最强（R^2=0730），这主要是由于干物质采食量能够为机体提供足够的能量和营养素。饲粮 starch 含量与乳糖产量存在线性正相关（R^2=0.489），这主要是由于乳糖合成的底物主要直接或间接来源于饲粮淀粉。

4 结　论

① 通过对 27 篇文献中的 123 个处理的数据进行整理，运用 Meta 分析发现，饲粮 NDF 与 starch 比值与奶牛的干物质采食量、产奶量、乳脂率和乳蛋白率存在显著的线性相关关系和一元线性回归关系。

② 与饲粮 NDF 和 starch 含量相比，饲粮 NDF 与 starch 比值能够更科学、准确和全面地反应饲粮的碳水化合物组成，能够用于预测奶牛的生产性能和乳成分。

参考文献：

[1] BECKMAN J L,WEISS W P.Nutrient digestibility of diets with different fiber to starch ratios when fed to lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2005,88(3):1015–1023.

[2] 杨永新,王加启,卜登攀,等.2010 年国际反刍动物营养研究进展——Ⅱ.碳水化合物营养[J].中国畜牧兽医,2011,38(3):5–10.

[3] REYNOLDS C K,AIKMAN P C,LUPOLI B,et al.Splanchnic metabolism of dairy cows during the transition from late gestation through early lactation[J].Journal of Dairy Science,2003,86(4):1201–1217.

[4] MA L,ZHAO M,ZHAO L S,et al.Effects of dietary neutral detergent fiber and starch ratio on rumen epithelial cell morphological structure and gene expression in dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2017,100(5):3705–3712.

[5] CANTALAPIEDRA-HIJAR G,LEMOSQUET S,RODRIGUEZ-LOPEZ J M,et al.Diets rich in starch increase the posthepatic availability of amino acids in dairy cows fed diets at low and normal protein levels[J].Journal of Dairy Science,2014,97(8):5151–5166.

[6] CANTALAPIEDRA-HIJAR G,PEYRAUD J L,LEMOSQUET S,et al.Dietary carbohydrate composition modifies the milk N efficiency in late lactation cows fed low crude protein diets[J].Animal,2014,8(2):275–285.

[7] PLAIZIER J C,KHAFIPOUR E,LI S,et al.Subacute ruminal acidosis (SARA),endotoxins and health consequences[J].Animal Feed Science and Technology,2012,172(1/2):9–21.

[8] KONONOFF P J,HEINRICHS A J.The effect of reducing alfalfa haylage particle size on cows in early lactation[J].Journal of Dairy Science,2003,86(4):1445–1457.

[9] ALLEN M S.Relationship Between fermentation acid production in the rumen and the

requirement for physically effective fiber[J].Journal of Dairy Science,1997,80(7):1447–1462.

[10] BEAUCHEMIN K A,ERIKSEN L,NØRGAARD P,et al.Short communication:salivary secretion during meals in lactating dairy cattle[J].Journal of Dairy Science,2008,91(5):2077–2081.

[11] BARGO F,MULLER L D,DELAHOY J E,et al.Milk response to concentrate supplementation of high producing dairy cows grazing at two pasture allowances[J].Journal of Dairy Science,2002,85(7):1777–1792.

[12] 姚军虎.反刍动物碳水化合物高效利用的综合调控[J].饲料工业,2013,34(17):1–12.

[13] FIRKINS J L,EASTRIDGE M L,ST-PIERRE N R,et al.Effects of grain variability and processing on starch utilization by lactating dairy cattle[J].Journal of Animal Science,2001,79(Suppl.E):E218–E238.

[14] HUHTANEN P,HRISTOV A N.A meta-analysis of the effects of dietary protein concentration and degradability on milk protein yield and milk N efficiency in dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2009,92(7):3222–3232.

[15] ABRAHAMSE P A,VLAEMINCK B,TAMMINGA S,et al.The effect of silage and concentrate type on intake behavior,rumen function,and milk production in dairy cows in early and late lactation[J].Journal of Dairy Science,2008,91(12):4778–4792.

[16] HRISTOV A N,ROPP J K.Effect of dietary carbohydrate composition and availability on utilization of ruminal ammonia nitrogen for milk protein synthesis in dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2003,86(7):2416–2427.

[17] AGUERRE M J,WATTIAUX M A,POWELL J M,et al.Effect of forage-to-concentrate ratio in dairy cow diets on emission of methane,carbon dioxide,and ammonia,lactation performance,and manure excretion[J].Journal of Dairy Science,94(6):3081–3093.

[18] KENDALL C,LEONARDI C,HOFFMAN P C,et al.Intake and milk production of cows fed diets that differed in dietary neutral detergent fiber and neutral detergent fiber digestibility[J].Journal of Dairy Science,2009,92(1):313–323.

[19] ALSTRUP L,WEISBJERG M R,HYMØLLER L,et al.Milk production response to varying protein supply is independent of forage digestibility in dairy cows[J] Journal of Dairy Science,2014,97(7):4412–4422.

[20] KRAUSE K M,COMBS D K,BEAUCHEMIN K A.Effects of forage particle size and grain fermentability in midlactation cows. Ⅰ .Milk production and diet digestibility[J].Journal of Dairy Science,2002,85(8):1936–1946.

[21] ALZAHAL O,OR-RASHID M M,GREENWOOD S L,et al.The effect of dietary fiber level on milk fat concentration and fatty acid profile of cows fed diets containing low levels of polyunsaturated fatty acids[J].Journal of Dairy Science,2009,92(3):1108–1116.

[22] KRAUSE K M,COMBS D K,BEAUCHEMIN K A.Effects of increasing levels of refined cornstarch in the diet of lactating dairy cows on performance and ruminal pH[J].Journal of Dairy Science,2003,86(4):1314–1353.

[23] ARNDT C,ARMENTANO L E,HALL M B.Corn bran versus corn grain at 2 levels of forage:Intake,apparent digestibility,and production responses by lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2014,97(9):5676–5687.

[24] MIYAJI M,MATSUYAMA H,HOSODA K,et al.Effect of replacing corn with brown grain rice in a total mixed ration silage on milk production,ruminal fermentation and nitrogen balance in lactating dairy cows[J].Animal Science Journal,2012,83(8):585–593.

[25] BEAUCHEMIN K A,YANG W Z,RODE L M.Effects of particle size of alfalfa-based dairy cow

diets on chewing activity,ruminal fermentation,and milk production[J].Journal of Dairy Science,2003,86(2):630–643.

[26] MULLINS C R,GRIGSBY K N,ANDERSON D E,et al.Effects of feeding increasing levels of wet corn gluten feed on production and ruminal fermentation in lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2010,93(11):5329–5377.

[27] RANATHUNGA S D,KALSCHEUR K F,HIPPEN A R,et al.Replacement of starch from corn with nonforage fiber from distillers grains and soyhulls in diets of lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2010,93(3):1086–1097.

[28] BENCHAAR C,HASSANAT F,GERVAIS R,et al.Methane production,digestion,ruminal fermentation,nitrogen balance,and milk production of cows fed corn silage-or barley silage-based diets[J].Journal of Dairy Science,2014,97(2):961–974.

[29] SAN EMETERIO F,REIS R B,CAMPOS W E,et al.Effect of coarse or fine grinding on utilization of dry or ensiled corn by lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2000,83(12):2839–2848.

[30] BOIVIN M,GERVAIS R,CHOUINARD P Y.Effect of grain and forage fractions of corn silage on milk production and composition in dairy cows[J].Animal,2013,7(2):245–254.

[31] STERK A,JOHANSSON B E O,TAWEEL H Z H,et al.Effects of forage type,forage to concentrate ratio,and crushed linseed supplementation on milk fatty acid profile in lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2011,94(12):6078–6091.

[32] CABRITA A R J,BESSA R J B,ALVES S P,et al.Effects of dietary protein and starch on intake,milk production,and milk fatty acid profiles of dairy cows fed corn silage-based diets[J].Journal of Dairy Science,2007,90(3):1429–1439.

[33] WHELAN S J,MULLIGAN F J,GATH V,et al.Short communication:effect of dietary manipulation of crude protein content and nonfibrous-to-fibrous-carbohydrate ratio on energy balance in early-lactation dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2014,97(11):7220–7224.

[34] ERIKSSON T,MURPHY M,CISZUK P,et al.Nitrogen balance,microbial protein production,and milk production in dairy cows fed fodder beets and potatoes,or barley[J].Journal of Dairy Science,2004,87(4):1057–1070.

[35] ZHANG S Z,PENNER G B,YANG W Z,et al.Effects of partially replacing barley silage or barley grain with dried distillers grains with solubles on rumen fermentation and milk production of lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2010,93(7):3231–3242.

[36] GOZHO G N,MUTSVANGWA T.Influence of carbohydrate source on ruminal fermentation characteristics,performance,and microbial protein synthesis in dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2008,91(7):2726–2735.

[37] ZHAO M,BU D P,WANG J Q,et al.Milk production and composition responds to dietary neutral detergent fiber and starch ratio in dairy cows[J].Animal Science Journal,2016,87(6):756–766.

[38] HALL M B,LARSON C C,WILCOX C J.Carbohydrate source and protein degradability alter lactation,ruminal,and blood measures[J].Journal of Dairy Science,2010,93(1):311–322.

[39] LE LIBOUX S,PEYRAUD J L.Effect of forage particle size and intake level on fermentation patterns and sites and extent of digestion in dairy cows fed mixed diets[J].Animal Feed Science and Technology,1998,73(1/2):131–150.

[40] HASSANAT F,GERVAIS R,JULIEN C,et al.Replacing alfalfa silage with corn silage in dairy cow diets:Effects on enteric methane production,ruminal fermentation,digestion,N balance,and milk production[J].Journal of Dairy Science,2013,96(7):4553–4567.

[41] 朱丹,张佩华,赵勐,等.不同中性洗涤纤维与淀粉比例饲粮对体外瘤胃发酵的影响[J].动物营养学报,2015,27(8):2580–2588.

[42] ALLEN M S.Effects of diet on short-term regulation of feed intake by lactating dairy cattle[J].Journal of Dairy Science,2000,83(7):1598–1624.

[43] DADO R G,ALLEN M S.Intake limitations,feeding behavior,and rumen function of cows challenged with rumen fill from dietary fiber or inert bulk[J].Journal of Dairy Science,1995,78(1):118–133.

[44] HRISTOV A N,PRICE W J,SHAFII B.A meta-analysis examining the relationship among dietary factors,dry matter intake,and milk and milk protein yield in dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2004,87(7):2184–2196.

[45] MAXIN G,RULQUIN H,GLASSER F.Response of milk fat concentration and yield to nutrient supply in dairy cows[J].Animal,2011,5(8):1299–1310.

[46] LIU H Y,ZHAO K,LIU J X.Effects of glucose availability on expression of the key genes involved in synthesis of milk fat,lactose and glucose metabolism in bovine mammary epithelial cells[J].PLoS One,2013,8(6):e66092.

[47] NRC.Nutrient requirements of dairy cattle[S].7th ed.Washington,D.C.:National Academic Press,2001.

Effects of Dietary Neutral Detergent Fiber and Starch Ratio on Performance and Milk Component Synthesis in Dairy Cows: a Meta-Analysis

NIU Junli[1,2] WANG Dian[3*] ZHAO Meng[3] ZHANG Wenju[2] BU Dengpan[1,4,5] MA Lu[1**]

（1. *State Key Laboratory of Animal Nutrition*, *Institute of Animal Science*, *Chinese Academy of*

*Contributed equally

**Corresponding author, assistant professor, E-mail: malu.nmg@163.com (责任编辑　菅景颖)

Agricultural Sciences, *Beijing* 100193, *China*; 2. *College of Animal Science and Technology*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832000, *China*; 3. *Inner Mongolia Youran Farming Co*., *Ltd*., *Hohhot* 010000, *China*; 4. *CAAS-ICRAF Joint Lab on Agroforestry and Sustainable Animal Husbandry*, *Beijing* 100193, *China*; 5. *Hunan Co-Innovation Center of Animal Production Safety*, *Changsha* 410128, *China*)

Abstract: Meta-analysis was conducted to investigate the effects of dietary neutral detergent fiber （NDF） and starch ratio （NDF:starch） on performance and milk component synthesis in dairy cows in this study. Twenty-seven published papers about carbohydrate nutrition were collected including 123 treatments. Meta-analysis method was performed to study the correlation of dietary NDF, starch contents and NDF:starch with dry matter intake (DMI), milk yield (MY) and milk components, and the corresponding regression analysis was performed. The results showed as follows: compared with dietary NDF and starch contents, dietary NDF:starch was found to be highly correlated with DMI (R^2=-0.799, P<0.01), MY (R^2=-0.730, P<0.01), milk fat percentage (R^2=0.664, P<0.01) and milk protein percentage (R^2=-0.788, P<0.01). Significant Linear regression relationships were observed between dietary NDF:starch and DMI (P=0.02), MY（P<0.01）, milk fat percentage（P<0.01）, milk protein percentage （P<0.01）, milk protein yield （P<0.01） and lactose yield （P<0.01）. When dietary NDF:starch increased by 1, DMI, MY, milk protein yield and lactose yield were reduced by 0.81, 1.36, 0.06 and 1.5 kg, respectively, while milk fat percentage and milk protein percentage were increased by 0.11 % and 0.07%, respectively. Therefore, Meta-analysis results indicate that dietary NDF:starch can be used as a nutritional assessment indicator to reflect the dietary carbohydrate composition, and it can be used to guide the production of dairy cows and the composition of milk components.

Key word: dairy cows; carbohydrate composition; performance; milk components; Meta-analysis